

토양 및 지하수 조건이 지열공조시스템의 성능에 미치는 영향에 관한 수치 해석적 연구

남 유 진[†]
청주대학교 건축공학과

Numerical Analysis for the Effect of Ground and Groundwater Conditions on the Performance of Ground Source Heat Pump Systems

Yujin Nam[†]
Department of Architecture, Cheongju University, Cheongju 360-764, Korea

(Received March 5, 2011; revision received April 4, 2011)

ABSTRACT: Recently, ground source heat pump (GSHP) systems have been introduced in many modern buildings which use the annually stable characteristic of underground temperature as one of the renewable energy uses. However, all of GSHP systems cannot achieve high level of energy efficiency and energy-saving, because their performance significantly depends on thermal properties of soil, the condition of groundwater, building loads, etc. In this research, the effect of thermal properties of soil on the performance of GSHP systems has been estimated by a numerical simulation which is coupled with ground heat and water transfer model, ground heat exchanger model and surface heat balance model. The thermal conductivity of soil, the type of soil and the velocity of groundwater flow were used as the calculation parameter in the simulation. A numerical model with a ground heat exchanger was used in the calculation and, their effect on the system performance was estimated through the sensitivity analysis with the developed simulation tool. In the result of simulation, it founds that the faster groundwater flow and the higher heat conductivity the ground has, the more heat exchange rate the system in the site can achieve.

Key words: Ground source heat pump(지열히트펌프시스템), Numerical simulation(수치시뮬레이션), Case Study(케이스스터디)

1. 서 론

지열이용 공조시스템은 종래의 공기열원 공조시스템에 비해, 보다 유리한 온도레벨의 열원을 사용함으로써 에너지 절감을 도모하는 기술이며, 신재생 에너지 이용 기술로서 주목을 받고 있다. 그러

나, 본 시스템은 외기온과 온도차가 발생하는 토양만 있으면 어디에서든 이용이 가능한 기술이지만, 어디에서든 높은 에너지 절감 효율이나 경제성이 얻어지는 것은 아니다. 그것은, 지열이용 시스템의 성능이 지반의 열적 특성이나 지하수의 조건 등에 따라 크게 달라지기 때문이며, 선정지에 대한 안정적인 성능 확보를 위해 입지조건에 적합한 이용 수법의 선정이 무엇보다 중요하다. 한편, 지열이용 공조시스템의 올바른 보급을 위해서는, 기본계획 단계에서 선정지의 도입가능성을 평가할 필요가 있

[†] Corresponding author
Tel.: 82-43-229-8479; fax: 82-43-229-8475
E-mail address: namyujin@cju.ac.kr

고, 그를 위해 지중 채열 및 방열량을 예측하는 수법과 개략적으로 선정지에 대한 도입경제성을 평가하는 수법이 요구되고 있다. 지중 채열량 예측 수법에 관한 연구는 북유럽을 중심으로 시작되었으며, 주로 H. S. Carslaw와 J. C. Jawger의 열전도이론(Cylindrical heat source theory)⁽¹⁾에 기초한 많은 연구가 이루어져왔다. E. W. Guernsey et al.⁽²⁾은 그들의 이론에 근거한 무한원통 모델을 사용하여 지중열교환기의 표면온도변화를 검토하였다. 또한, 미국의 Kavanaugh는 등가단면적 모델을 이용하여, 보어홀과 U자관 사이의 열저항을 이용한 해석을 실시하였다.⁽³⁾ 더욱이, Eskilson은 유럽에서 널리 이용되고 있는 설계틀 EED (Earth Energy Design)에서 사용되는 g-function을 도입하여 무한선열원의 온도장 중첩계산을 실시하고 그 응용성을 평가하였다.⁽⁴⁾ 그러나, 이러한 모델들은 선형열원모델(Line Source Model)과 원통좌표계를 기초로 하고 있어, 복잡한 형상의 열교환기나 지하수 흐름이 있는 조건의 열이동 현상을 재현하기 어렵다. 이러한 단점을 보완하기 위해, 저자는 선행연구(Nam et al.)⁽⁵⁾에서 지중열 및 지하수이동해석 모델과 지중열교환기 모델, 지표면 열교환 모델을 연성할 수 치 시물레이션 모델을 개발하여, 그 적용성에 대해 검토하였다. 본 연구에서는 개발된 시물레이션 모델을 사용하여, 토양 및 지하수 흐름의 조건이 지중 채열량 및 시스템 성능에 미치는 영향에 대해 정량적인 평가를 실시한다.

2. 수치시물레이션 모델의 개요

Fig. 1은 본 연구에서 사용된 시물레이션 모델의 개요를 나타낸다. 본 해석수법에서는 선정지 토양의 열응답실험(Thermal Response Test)이나 지질조사 데이터로부터 수치시물레이션에 필요한 토양의 열적 물성치를 추정하고, 건물냉난방부하 모델과 지중채열량 예측시물레이션을 결합하여 지중온도 변화 및 시스템 성능을 평가한다. 해석수법 및 토양 열물성치 추정방법에 관해서는 선행 연구에서 상세히 서술하고 있다.

3. 해석모델의 개요

3.1 해석개요

지반조사 데이터와 지하수 데이터로부터 지중열

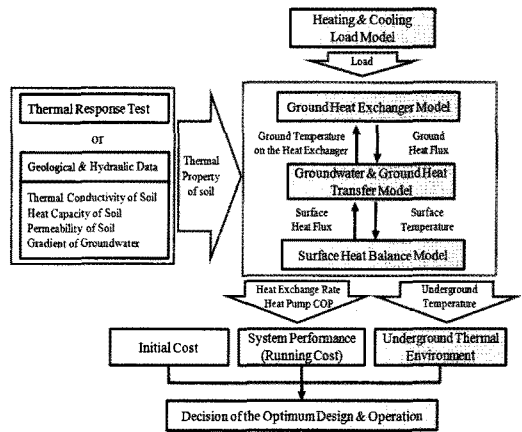


Fig. 1 Simulation Method.

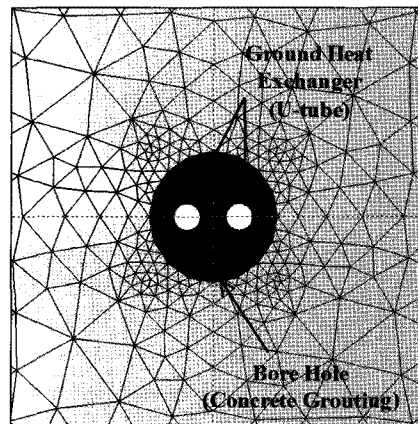


Fig. 2 Simulation model.

이용 시스템에 적합한지 여부를 평가하기 위해서는 토양과 지하수가 갖는 열물성치가 시스템 성능에 어느 정도 영향을 미치는가를 미리 파악할 필요가 있다. 본 연구에서는 토양과 지하수 조건이 지중채열 및 방열량에 주는 영향에 대해 검토하기 위해, 일반적인 보어홀 방식의 지중열 교환 U튜브(깊이 100 m)를 이용한 민감도 분석을 실시하였다. 해석수법은 선행연구에서 개발된 지하수 및 지중열 이동 해석 코드(FEFLOW)에 지중열교환기 모델과 지표면 열수지 모델을 조합한 툴을 사용하였다. Fig. 2는 시물레이션 모델을 나타낸다. 20 m×20 m×100 m 영역의 중심에 직경 0.16 m의 보어홀을 설치하고, 그 안에 지중열 교환기(U튜브, 40A, 내경 : 33 mm, 외경 : 40 mm)를 삽입한 것이다. 보어홀과 U튜브의 사이에는 콘크리트(열전도율 : 1.5 W/mK, 열용량 : 2.8 MJ/m³K)를 충전하였다. Fig. 3은 계산

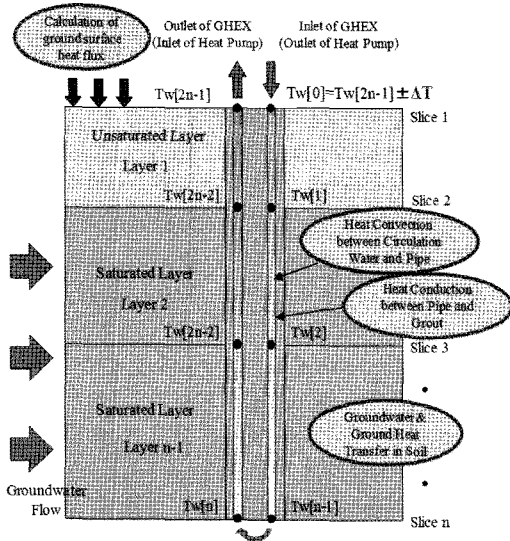


Fig. 3 Calculation summary.

과정의 개념도를 보여준다. 지중열교환기 내 순환수 온도의 계산은, 건물의 냉난방부하량에 따라 ΔT 를 설정한 후, 각 케이스에 있어서 냉방시는 열교환기 출구 온도에 ΔT 를 가산($T_w(2n-1)+\Delta T$)하고, 난방시는 반대로 ΔT 를 감산한 온도($T_w(2n-1)-\Delta T$)를 열교환기 입구온도 $T_w(0)$ 로 주어 계산하였다. 이때, 지중열교환기 내의 순환수온도는 각 Slice의 파이프 내벽온도 및 토양온도에 의해 순차적으로 결정된다. 한편, 지열히트펌프 시스템에서 과도한 채열 또는 방열 운전은 지중 온도의 하강 또는 상승을 초래하게 되어, 공기열원에 대비한 지열이용의 장점을 보장할 수 없게 된다. 이것을 방지하기 위해, 지중열 교환기 입구 온도(히트펌프 출구 온도)는 지중열원 히트펌프의 안정된 COP의 확보와 기기의 보호 등을 고려하여, 난방시 5°C 이하, 냉방시 35°C 이상이 되지 않도록 운전조건을 설정하였다. 본 시뮬레이션에서는 운전 개시의 지중열 열교환기의 출입구 온도차(ΔT)를 4°C로 일정하게 하고, 열원온도의 설정상(5°C 이상, 35°C 이하) ΔT 가 4°C가 되지 않는 경우는 ΔT 를 작게 하여 보다 적은 채열 및 방열량으로 운전하도록 하였다. 이러한 운전 방법을 통해 최종적으로 각 조건에 있어 지중으로부터 얻을 수 있는 최대 채열 및 방열량을 산출할 수 있게 된다.

3.2 해석 조건

Table 1은 시뮬레이션 조건 및 공조 운전 조건을

Table 1 Simulation condition

Ground heat exchanger	Single U-tube 40 A Outer Diameter 40 mm Inner Diameter 33 mm Bore Hole ϕ 160 Concrete Grouting
Domain	20 m × 20 m × 100 m
Heat source condition	Flow Rate 15 L/min, ΔT 4°C Below 35°C in Cooling Above 5°C in Heating
Operation	Cooling 6/1~8/31 Heating 12/1~2/28 9 : 00~18 : 00
Initial temp	17°C

Table 2 Calculation cases

Case	Type	P_0	k [10 ⁻⁴ m/s]	λ [W/mK]	C [MJ/m ³ K]	V [m/y]
1	Rock	0.01	0.01	3.50	2.92	N.A.
2				7.00		
3				1.75		
4	Gravel	0.35	0.35	1.83	2.97	N.A.
5	Sand	0.30	0.30	1.14	1.44	N.A.
6						10
7						100
8	Clay	0.60	0.60	1.43	2.62	N.A.

나타낸다. 동절기 1월, 2월, 12월의 3개월은 난방운전으로 하고, 지중으로부터 채열한다. 하절기 6월~8월은 냉방운전으로 하고, 지중에 방열하는 것으로 한다. 또한, 운전시간은 오전 9시부터 오후 6시까지 9시간으로 하고, 주 7일 운전으로 설정하여 계산하였다. 실제 연중 연속운전에서는 동절기채열 및 하절기방열에 따른 토양 온도의 계절 간 변화가 다음의 채·방열에 영향을 주지만, 본 계산에서는 냉난방, 각각 같은 토양 온도 조건에서 계산하였다. 한편, 지하수위는 -1 m로 하고, 지하수위 아래 깊이는 포화조건으로 하였다. 또한, 지하수류는 Darcy법칙에 따른 수위경사로 주었다. 순환수의 초기 온도는 17°C로 하고, 지중 온도의 재현을 위해 1년 간 지표면 열변동을 준 후에 운전을 실시하였다. 지중열교환기내 순환수량은 15 L/min으로 하였다. 한편, Table 2는 각 경우의 토양 및 지하수 조건을 보여준다. 본 연구에서는 지질을 크게 화강암, 자갈, 모래, 점토의 네 가지 종류로 나누고, 각각의 경우를 Case 1, 4, 5, 8로 하여 각 케이스에

대한 지중 채열 및 방열량을 검토하였다. 또한, Case1의 화강암에 있어서 고체부의 열전도율(λ)을 3.50 W/mK로 한 경우를 Case 1, 2배로 한 경우를 Case 2, 절반으로 한 경우를 Case 3으로 하여 검토하였다. 더욱이, Case 3의 모래 지질에 있어서 지하수 흐름의 영향을 검토하기 위해, 지하수가 흐르지 않는 경우를 Case 5, 지하수 유속(v) 10 m/y의 경우를 Case 6, 지하수 유속 100 m/y의 경우를 Case 7로 설정하였다. 각 케이스에 대한 각각의 토양 조건은 사단법인 일본 기계학회의 전열공학자료⁽⁶⁾에 기초하여 설정한 것이다. 여기서 P_o 는 간극률, k 는 토양의 투수계수, C 는 토양 고체부의 열용량을 나타낸다. 본 연구에서는 각 케이스의 지질 및 지하수 조건에 있어서 일정 운전 조건에서 얻을 수 있는 열원수의 온도로 개략적인 히트펌프 COP(Coefficient of Performance)를 산출하고 그 결과와 지중채열 및 방열량으로 영향도를 평가하였다.

4. 해석결과

4.1 토양의 열전도율의 영향

Fig. 4는 화강암의 조건에서 열전도율을 변경한 Case 1~Case 3의 결과로, 냉방시의 방열량과 난방

시의 채열량을 각각 나타낸다. 냉방 운전에 있어서 U튜브내 열원수의 온도는 운전 개시와 함께 조금씩 상승하지만, 각 케이스별로 상승률이 다르게 나타난다. 냉방시에는, 열전도율이 가장 큰 Case 2 ($\lambda : 7.0$ W/mK)가 Case 1($\lambda : 3.5$ W/mK)과 Case 3($\lambda : 1.75$ W/mK)에 비해 온도 상승률이 낮았고, 평균 온도에서도 23.1°C로 가장 낮았다. 이것은 토양의 열전도율이 높을수록 지하에 방열한 열이 빨리 확산되고, 지중으로 방열할 수 있는 열량도 증가한다는 것을 시사하고 있다. 한편, 난방의 경우, 열전도율이 가장 높은 Case 2에서 가장 높은 온도의 열원수를 얻을 수 있고, 그 평균 온도는 10.8°C였다. Table 3에 각 케이스의 열원수 온도의 냉난방기간 평균(T_{av})을 산출해서 나타냈다. 표에서 HP는 히트펌프, G는 지중을 각각 나타낸다.

4.2 지하수 흐름의 영향

Fig. 5는 모래의 조건에서 지하수 흐름을 변화시킨 Case 5~Case 7의 결과를 나타낸다. 지하수 흐름이 없다고 가정된 Case 5의 경우, 냉방 방열량은 40.0 W/m, 난방 채열량은 28.0 W/m로 나왔다. 반면, 지하수 흐름이 100 m/y인 경우, 방열량 및 채열량은 모두 42.0 W/m로 계산되어, 지하수 흐름이 없

Table 3 Calculation results according to λ

Case	λ [W/mK]	T_{av} in Cooling[°C]		T_{av} in Heating[°C]	
		HP → G	G → HP	HP → G	G → HP
1	3.5	28.4	24.4	5.8	9.7
2	7.0	27.1	23.1	6.8	10.8
3	1.75	30.7	26.7	5.4	8.8

Table 4 Calculation results according to V

Case	V [m/y]	T_{av} in Cooling[°C]		T_{av} in Heating[°C]	
		HP → G	G → HP	HP → G	G → HP
5	0	33.6	29.8	5.2	7.9
6	10	28.9	24.8	5.7	9.5
7	100	25.8	21.8	8.2	12.2

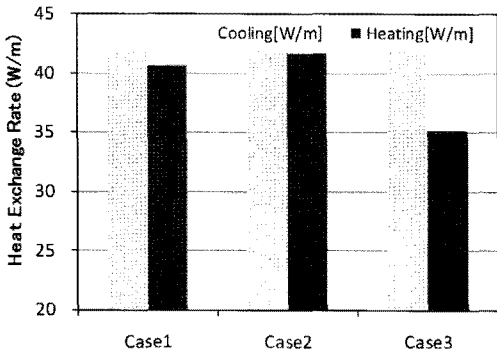


Fig. 4 Heat exchange rate of Cases 1 to 3.

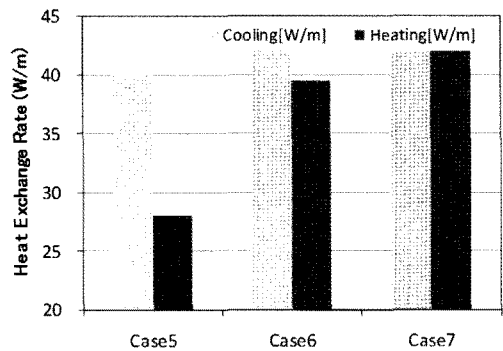


Fig. 5 Heat exchange rate of Cases 5 to 7.

Table 5 Calculation results according to soil type

Case	Type	T_{av} in Cooling[°C]		T_{av} in Heating[°C]	
		HP → G	G → HP	HP → G	G → HP
		1	28.4	24.4	5.8
4	Gravel	31.7	27.6	5.3	8.5
5	Sand	33.6	29.8	5.2	7.9
8	Clay	33.4	29.5	5.3	8.0

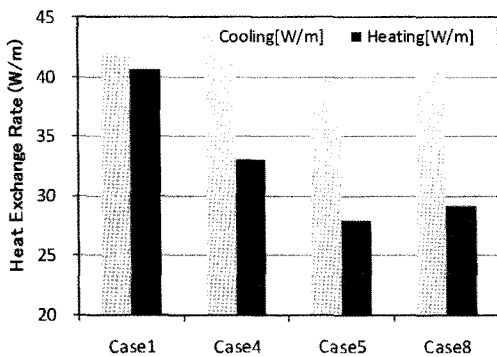


Fig. 6 Heat exchange rate of Cases 1, 4, 5 and 8.

는 Case 5에 비해, 방열량 5% 및 채열량 50%의 증가를 나타냈다. 이것은 지하수 흐름이 존재할 경우, 지하수 흐름에 의한 이류(advection)효과로 지중온도의 회복이 현저하게 나타나는 것을 보여준다. 한편, Table 4는 Case 5~Case 7의 계산 결과로서, 냉방 및 난방기간의 열원수 온도의 평균값을 각각 나타낸다. Case 6과 Case 7의 난방의 경우, 채열량은 42.0 W/m로 같은 값을 가지나, 지하수 흐름이 상대적으로 빠른 Case 7의 열원수 평균온도(12.2°C)가 Case 6의 온도(9.5°C)에 비해 높아 히트펌프의 COP 향상에 영향을 줄 것으로 판단된다.

4.3 지질 종류의 영향

Fig. 6은 지질 조건에 따른 방열 및 채열량의 변화를 계산한 결과로 각각 화강암(Case 1), 자갈(Case 4), 모래(Case 5), 점토(Case 8)의 결과를 나타낸다. 본 계산결과에서는 화강암, 자갈, 점토, 모래 순으로 방열 및 채열량이 많은 것으로 나타났다. 이것은 토양의 고체부가 가진 고유의 열전도율과

Table 6 Calculation results of heat pump COP

Case	Heat Pump COP	
	Cooling	Heating
1	6.05	4.12
2	6.33	4.20
3	5.60	4.06
4	5.43	4.04
5	5.09	4.01
6	5.96	4.10
7	6.62	4.33
8	5.13	4.02

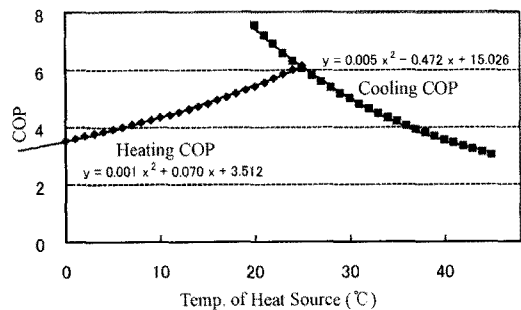


Fig. 7 Performance curve of heat pump.

공극율에 의해 전체의 열전도율이 결정되고 그 결과가 방열 및 채열량에 반영된 것으로 분석된다. 한편, Table 5는 지질 조건을 변화시킨 케이스의 열원수 온도 계산 결과를 나타낸다.

4.4 각 온도조건에 따른 히트펌프 성능의 산출

Fig. 7은 열원수 온도에 따른 수열원 히트펌프의 성능곡선으로 2차측 온도조건이 냉방에서 7°C~12°C, 난방에서 40~45°C일 때의 히트펌프 COP (Coefficient of Performance)를 나타낸다.⁽⁵⁾ 본 연구에서는 각 케이스별 동일 부하 조건을 가정하고 수열원 히트펌프의 성능곡선을 이용하여, 히트펌프 COP를 산출하였다. Table 6은 각 케이스별 열원수 평균온도를 통해 산출한 히트펌프의 냉난방 COP를 보여준다. 본 해석결과에서는 모래 조건에서 100 m/y의 지하수 흐름이 존재하는 Case 7의 냉난방 COP가 각각 6.62(냉방), 4.33(난방)으로 가장 높았다. 또한 지질 및 지하수 조건에 따라 히트펌프의 COP가 최대 약 30%의 차이(Case 5와 Case 7)가 나타남을 확인하였다.

6. 결 론

본 연구에서는 지질 및 지하수 조건이 지중 채열량 및 시스템 성능에 미치는 영향을 정량적으로 분석하기 위해, 지하수 및 지중열 이동 해석모델과 지중열교환기 모델, 지표면열수지 모델을 연성한 시뮬레이션 수법을 이용하여, 수치해석을 실시하였다. 본 연구에서는 아래와 같은 결과를 얻었다.

(1) 화강암을 대상으로 열전도율을 2배, 1/2배 로 변화시킨 결과, 동기 채열량은 각각 3% 증가, 13% 감소로 나타났다.

(2) 모래의 지질 조건에서 지하수 유속이 100 m/y일 경우, 지하수 유속이 없는 경우에 비해 지중 채열량은 50% 증가하는 것으로 나타났다.

(3) 수냉식 히트펌프의 성능곡선을 이용한 히트펌프 냉난방 COP 산출을 통해, 지질 및 지하수 조건이 히트펌프 성능에 미치는 영향을 정량적으로 분석하였다.

향후, 건물냉난방부하모델 및 타열원 시스템과 연계된 시뮬레이션 수법을 개발하여, 다른 인자들이 지열히트펌프시스템 성능에 미치는 영향에 관한 검토를 실시할 예정이다.

참고문헌

1. Carslaw, H. S. and Jaeger, J. C., 1946, Conduc-

- tion of heat in solids. Clarendon press, Oxford.
2. Guernsey, E. W., Betz, P. L. and Skan, N. H., 1949, Earth as a heat source or storage medium for the heat pump, ASHVE Transaction, Vol. 55, pp. 321-344.
 3. Kavanaugh S. P., 1984, Simulation experimental verification of vertical ground-coupled heat pump systems, Ph.D. Dissertation, Oklahoma State University.
 4. Eskilson, P., 1987, Thermal Analysis of Heat Extraction Boreholes, Ph.D. Thesis, University of Lund.
 5. Nam Y. J., Ooka R. and Hwang S. H., 2007, Development of a numerical model to predict heat exchange rates for a ground-source heat pump system, Energy and Buildings, Vol. 40, pp. 2133-2140.
 6. Heat Transfer, 1996, The Japanese Society of Mechanical Engineering Data Book, p. 321, (in Japanese).
 7. Shiba Y., Ooka R. and Sekine K., 2007, Development of high-performance water-to-water heat pump for ground source application, ASHRAE Transactions Vol. 113, No. 2, pp. 261-270.